

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.4.617>

JCCT 2023-7-75

공간적 특성에 따른 화재 확산 예측 및 실시간 대피 시스템 연구

Prediction of Fire Spread and Real-Time Evacuation System according to Spatial Characteristics

안남기*, 이건희**, 김민정***, 김규호****

Nam-Gi An*, Geon-Hui Lee**, Min-jeong Kim***, Kyu-Ho Kim****

요약 지난 10년간 우리나라에서 발생한 화재 사건 중 건물 화재가 가장 많고 재산과 인명 피해가 가장 많다. 하지만 기존 소방 시스템은 비상구 위치만 알려주고 안전한 경로를 안내해 사상자들이 원활하게 대피할 수 있도록 도와주지는 않는다. 공간적 특성을 이용하여 수직적 특성과 수평적 특성을 구분하여 성공적인 대피를 돕는 시스템을 제안하였다. 본 연구에서는 온도 감지 센서와 연기 센서 값을 이용하여 화재를 예측하고, Dijkstra 알고리즘을 통해 최적의 대피 경로를 계산하여 효과적인 대피 시스템을 제안하였다.

주요어 : 화재 예측, 온도 센서, 연기 센서, 다익스트라 알고리즘

Abstract Among the fire incidents in Korea over the past decade, building fires are the most common, and property and human casualties are the most common. However, the existing fire fighting system does not only inform the location of emergency exits and guide safe routes to help casualties evacuate smoothly. A system was proposed to help successful evacuation by distinguishing vertical and horizontal characteristics using spatial characteristics. In this study, an effective evacuation system was proposed by predicting fires using temperature detection sensors and smoke sensor values, and calculating the optimal evacuation path through the Dijkstra algorithm.

Key words : Fire Prediction, Temperature Sensor, Smoke Sensor, Dijkstra Algorithm

1. 서론

최근 10년간 우리나라의 연평균 화재 건수는 약 4만 건이고, 인명 피해는 약 2천 명에 이른다. 이 중 건축·구조물 화재가 가장 많이 발생했으며, 이는 유형별 화재

중 매년 가장 큰 인명, 재산 피해 규모를 차지한다[1]. 인구는 점점 많아지고 땅은 한정되어 있기 때문에 지상 및 지하로 확장되어 건축물의 고층화, 복잡화에 따른 도시의 과밀화로 인해 지상 공간, 지하 공간은 각각의 특징과 구조가 다르며 이에 따라 건축물들이 복잡화됨에 따라 재난 발생 시 잠재 위험이 가중되고 있다[2].

*준회원, 을지대학교 의료IT학과 학부생 (제1저자)
**준회원, 을지대학교 의료IT학과 학부생 (참여저자)
***준회원, 을지대학교 의료IT학과 학부생 (참여저자)
****정회원, 을지대학교 의료IT학과 교수 (교신저자)
접수일: 2023년 6월 19일, 수정완료일: 2023년 6월 30일
게재확정일: 2023년 7월 5일

Received: June 19, 2023 / Revised: June 30, 2023
Accepted: July 5, 2023
****Corresponding Author: meowmeow123@naver.com
Dept. of Medical IT, Eulji-Univ, Korea

또한, 공간의 이용 편리성 뿐 만 아니라 안정성에 대해서도 충분히 고려해야 하며, 화재 발생 시 초기 대응 능력이 필요하다[3].

건축물 내부 공간에서 화재가 발생했을 경우 재실자들의 성공적인 대피를 위해서는 재실자의 이동속도와 그들이 이용할 수 있는 화재와 관련된 정보와 화재의 발생 이후 안전한 곳으로 피난하기까지의 시간 손실을 줄이는 것이 인명 안전을 위한 중요한 역할이다[4].

기존의 화재 시스템의 대피 유도등은 유동적이지 않아 화재 발생 후 대피경로가 화재나 연기로 인해 안전하지 않을 수 있다는 문제점이 있다.

또한, 공간적 특성으로 나누어 봤을 때, 지상 공간의 경우 고층 건물이 많아 화재 시 비교적 개방적이고 수직적 특성으로 공기의 유입으로 인한 불 번짐이 빠르게 일어나고, 지하 공간의 경우 폐쇄적인 수평적 특성으로 연기 확산이 빠른 편이기에 지상과 지하 공간 각각에 맞는 화재 대피 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 화재 발생 후 지상 및 지하 공간에 따라 수평, 수직적 특성을 통해 화재 확산을 예측하여 비상 유도등을 유기적으로 제어하여 재실자들에게 화재 및 연기로부터 재실자들의 이동속도 저하를 최소화하고, 알고리즘을 통해 최적 대피경로를 재실자에게 안내하여 성공적인 대피 가능성을 높일 수 있는 화재 대피시스템을 제안하였다.

II. 관련 연구

1. 공간 유형 별 특성

아래의 표 1은 국민안전처 국가화재정보센터에서 제공하는 재난·재해 등 각종 비상상황에 대처하기 위한 사항 중 화재 발생 장소별 대응 방법[5]과 지상과 지하 공간에서의 특성을 나타낸 표이다.

표 1. 화재 발생 장소별 대응 방법 및 공간 특성
Table 1. Responding to fire by location and Spatial Characteristics

	지상	지하
대응 방법	계단을 통해 밖으로 대피하고, 1층으로 이동이 어려운 경우 옥상으로 대피한다. 대피공간의 경우 화재로부터 60분 이상 보호가 가능하므로 신속하게 이동한다.	대피 유도등을 통해 대피하고, 유도등이 없을 경우, 벽이나 보도 불턱을 따라 이동한다. 화재 발생 반대쪽, 공기가 유입되는 방향으로 대피한다.
공간 특성	플래시 오버 효과 환기 시스템 작동 연돌 효과	폐쇄적 구조 연기의 축적 기압 증가

지상 공간의 경우 연소반응 특성 상 연소 확산 속도가 매우 빠르고 분출된 화염과 연기로 인해 상층부를 발화시켜 위험이 있다. 또한, 건축물 내부와 외부의 온도차로 발생하며 이로 인한 상승 및 하강 기류로 화재 발생 시 연돌 효과(stack effect)가 발생하여 큰 피해를 야기한다[6].

지하 공간의 경우 수평적 확대와 입체적인 복잡화로 인해 화재 위치를 빠르게 확인하기 어렵고, 인명 탐색이 제한되며, 피난 유도 및 소화 활동에 장애가 있다. 화재 발생 시 연소 반응으로 인한 유독가스에 의해 생리적 문제가 발생한다[7].

2. Dijkstra알고리즘

Dijkstra 알고리즘은 어떤 링크도 음수 값을 갖지 않는 방향 그래프에서 주어진 출발 노드와 도착 노드 사이의 최단 경로를 구하는 알고리즘으로서, 매 반복마다 거리의 누적 값이 가장 작은 노드의 경로를 표시하는 Label-setting 기법이다[8].

$$\text{distance}[v] = \text{distance}[u] + \text{weight}(u, v)$$

III. 화재 대피 시스템 모델

1. 화재 대피 시스템

화재 발생 시 대피하는 상황의 시나리오를 바탕으로 건물의 공간적 특성 중 깊이와 넓이의 변수를 중심으로 수직적 특성과 수평적 특성을 나누어 화재 발생 시 효율적인 대피를 위해 아래 그림 1과 같이 시스템을 구성하였다.

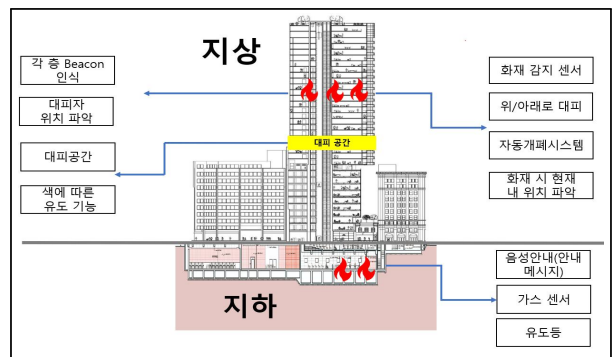
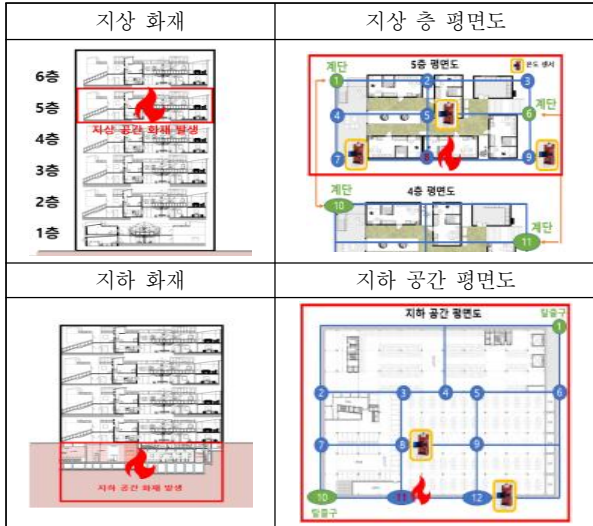


그림 1. 화재 대피 시스템
Figure 1. Fire Escape System

지상과 지하의 평면도에는 다음 표 2와 같이 구역별로 나누어 노드들이 지정되어있고 각각의 노드들에는 공간에 따라 화재에 영향을 주는 요인을 감지하기 위하여 지상공간에는 온도 센서, 지하 공간에는 연기감지 센서를 부착하였다.

표 2. 지상 및 지하 화재 공간 구상도
 Table 2. Ground and Underground Fire Space Schematic



2. 수직 공간 대피 알고리즘

1) N층 계단 대피 유도

표 3과 같이 화재 발생 공간이 지상으로 확인되면 초록색 대피 유도등을 작동시킨다. 지상 고층 건물의 경우 불이 위로 빠르게 번지기 때문에, N층에서 화재 발생 시 N층보다 하단 층은 비상 계단의 유도등을 아래로 표시하고, N층보다 상단 층에 있는 사람이 밑으로 대피하는 것이 불가능한 경우, 비상 계단 유도등을 위로 표시하여 상황에 맞게 대피할 수 있도록 한다.

2) 대피 공간으로 유도

신체적 약자 또는 몸이 불편한 사람들을 위해 대피 공간으로 유도하는 색깔의 유도등을 노란색으로 설정하고 노란색의 유도등이 대피 공간임을 확실하게 인지할 수 있도록 표시해주고 유도할 수 있도록 한다.

3) Beacon 설치

화재 감지기가 화재 발생을 감지하면 화재 발생 위치와 화재 정보(가스, 온도, 불꽃의 세기)를 스마트폰과 BLE 비콘을 통해 구한 사용자의 위치정보를 시스템 서

버에 전송한다. 건물 내부 평면도를 2차원 배열로 표현하고, 화재가 발생한 위치와 화재 정보를 2차원 배열에 표시한다.

표 3. 지상 화재 발생 시 대피시스템 알고리즘
 Table 3. Algorithm for evacuation system in ground

```

Algorithm for evacuation system in ground
if fire_detected:
    activate_emergency_lights()
    confirm_fire_location()
    if evacuee_can_getout_safely():
        floor_number = determine_fire_floor()
        if current_floor > floor_number:
            activate_green_light()
            guide_to_emergency_staircase()
        else:
            activate_yellow_light()
            guide_to_safe_floor()
Read fire measurements from sensors
If fire is detected:
    Identify the floor where the fire occurred (N)
    For each person:
        If person is above floor N:
            Direct the person to the rooftop for evacuation
        Else if person is below floor N:
            Direct the person to the floor below for evacuation
if PlaceBLEBeaconButtonsOnEachFloor():
    Set evacuationRoute as an empty list
    Set currentLocation as null
DetectButtonPressEvent():
    floorButtonPressed = GetPressedFloorButton()
    UpdateCurrentLocation(floorButtonPressed)
SetStartingPoint(currentLocation):
    evacuationRoute
DisplayEvacuationRoute(evacuationRoute):
    FollowEvacuationRoute(evacuationRoute)
if ReachedSafeLocation():
    EndEvacuationProcess()
Repeat:
    from Button Press Detection until evacuation process ends
    
```

3. 수평 공간 대피 알고리즘

1) 가스 감지

표 4와 같이 화재가 발생하면 불에 타 사망하는 경우보다 연기로 인한 질식사(窒息)가 많이 일어나는 점을 생각하여 가스 센서를 통해서 가스를 인지한 후 그 부분을 막음으로써 가스로 인한 질식사를 방지한다.

2) 음성 안내 기능

화재가 발생 직후 화재 감지 센서를 사용하여 화재를 확인하고 음성 안내 메시지와 음성 안내를 통해 화재가 발생했음을 인지하고 유도등을 통해 대피를 유도한다.

표 4. 지하 화재 발생 시 대피시스템 알고리즘
Table 4. Algorithm for evacuation system in underground

Algorithm for evacuation system in underground	
if fire is detected:	
activate fire detection system	
confirm fire location	
if fire in basement is detected by measurement:	
activate evacuation broadcast and guidance message	
measure gas level in space	
while evacuating:	
guide people to exits with lower gas levels	
repeat evacuation broadcast message as necessary	
measure gas levels and adjust evacuation guidance as necessary	
when the area is safe:	
end the evacuation	

IV. 모의 실험

표 5. 다익스트라 알고리즘
Table 5. Dijkstra Algorithm

Dijkstra's algorithm code	
#define MAX_NODES 100	
int node;	
int dist[MAX_NODES];	
bool visited[MAX_NODES];	
int exit[MAX_NODES];	
int exit;	
int findMinDistance() {	
int min_dist = INT_MAX;	
int min_node = -1;	
for (int i = 0; i < node; i++) {	
if (!visited[i] && dist[i] < min_dist) {	
min_dist = dist[i];	
min_node = i;	
return min_node;	

본 연구에서는 소방법 시행령에 제시된 재실자 인명 안전 기준에 의거 하여 온도 값은 60℃ 이하, CO 농도는 0.14% 이하, O2 농도는 15% 이상의 안전 수치를 기

준으로 화재를 예측하였다. 또한, Dijkstra 알고리즘을 이용하여 아래 표 5와 같이 알고리즘을 반복하여 각 노드 별 시간의 흐름에 따른 대피경로를 산출하여 출구까지의 최소 거리와 시간을 계산하여 최적의 출구로 향하도록 유도등을 제어하였다.

1. 지상 화재 확산 예측 및 최적 대피경로 도출

지상 공간의 경우 아래 그림2와 같이 2개의 출구노드, 8개의 일반노드로 구성하였고, 화재는 8번 노드에서 발생하였다. 아래 표 6과 같이 각 노드 별로 온도 센서를 통해 온도 값을 측정하였다. 이에 따라 화재 확산을 예측하고 각 노드 별 최적 대피 경로를 산출하였다.

표 6. 각 노드 별 온도 값
Table 6. Temperature values for each node

노드	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T=1	20	20	20	20	20	20	20	100	20
T=2	20	20	20	20	20	60	40	120	80
T=3	30	35	40	35	60	70	50	150	100

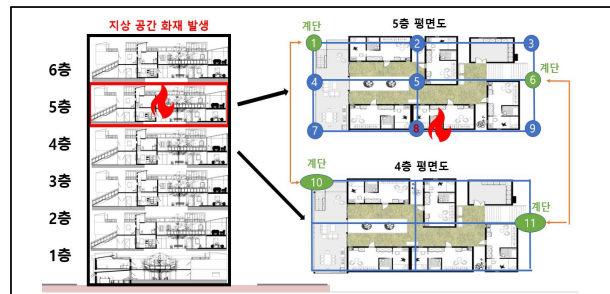


그림 2. 지상 공간 구상도
Figure 2. Space design in ground

아래 그림 3은 T=1(발화시점)일 때의 노드 별 온도를 나타낸 그림이며, 그림 4는 2,3,4,5번 노드의 최적 대피경로를 표현한 그림이다. T=1일 때 피난계단은 1,6번 노드이며 화재 확산이 되지 않은 상태이므로 각 노드는 가장 가까운 피난계단을 이용하여 대피할 수 있다. 아래의 표 7은 노드별 최적 대피경로를 통한 대피시간이다.

표 7. T1 노드 별 대피경로 및 대피시간
Table 7. Evacuation path and time of T1 juncture nodes

노드	경로	시간(Sec)
2	2-1	28.57
3	3-6	10.38
4	4-1	10.38
5	5-6	28.57
7	7-4-1	25.97
9	9-6	15.58

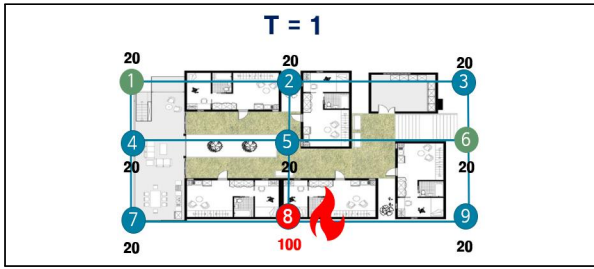


그림 3. T1 시점의 노드
 Figure 3. The nodes in T1

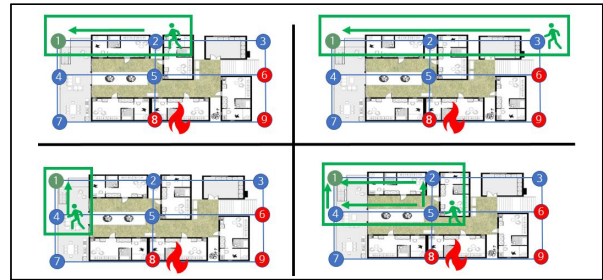


그림 6. T2 시점의 2,3,4,5 노드의 대피경로
 Figure 6. Evacuation path of 2,3,4,5 node in T2

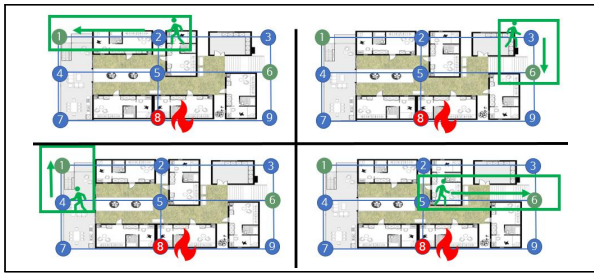


그림 4. T1 시점의 2,3,4,5 노드의 대피경로
 Figure 4. Evacuation path of 2,3,4,5 node in T1

아래 그림 5는 T=2(발화 시점 N초후)의 시점이다. 발화 이후 6번 노드는 20에서 60으로 온도가 상승했으며, 9번 노드는 20에서 80으로 온도가 상승했다. 화재는 발화지점 기준 북동쪽으로 확산했음을 알 수 있으며, 인명 안전 기준에 의해 9번 노드와 6번 노드는 폐쇄됨을 나타냈다. 따라서 아래 표 8과 같이 최적 대피 경로가 변경되었음을 나타냈고, 아래 그림 6은 2,3,4,5번 노드의 변경된 대피경로를 나타낸 그림이다.

표 8. T2 노드 별 대피경로 및 대피시간
 Table 8. Evacuation path and time of T2 juncture nodes

노드	경로	시간(Sec)
2	2-1	28.57
3	3-2-1	57.14
4	4-1	10.38
5	5-4-1 / 5-2-1	38.96
7	7-4-1	25.97

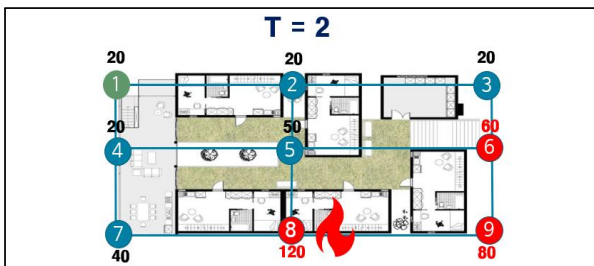


그림 5. T2 시점의 노드
 Figure 5. The nodes in T2

아래 그림 7은 T=3(발화 시점 2N초후)의 시점이다. T=2 시점 이후 9번 노드는 80에서 100으로 온도가 상승했고, 6번 노드는 60에서 70으로 상승했으며, 추가로 5번 노드는 50에서 60으로 온도가 상승하여 화재가 북쪽으로 추가 확산 되었음을 알 수 있으며, 이에 5번 노드는 폐쇄됨을 나타냈다. 따라서 아래 표 9와 같이 최적 대피 경로가 변경되었음을 나타냈고, 아래 그림 8은 2,3,4,7번 노드의 변경된 대피경로를 나타낸 그림이다.

표 9. T3 노드 별 대피경로 및 대피시간
 Table 9. Evacuation path and time of T3 juncture nodes

노드	경로	시간(Sec)
2	2-1	28.57
3	3-2-1	57.14
4	4-1	10.38
7	7-4-1	25.97

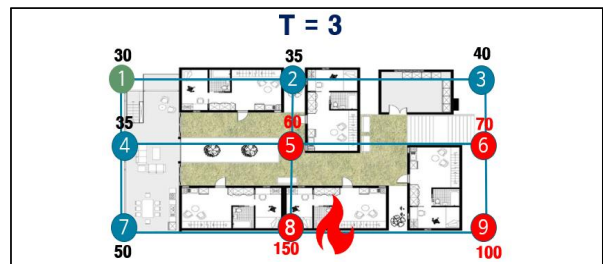


그림 7. T3 시점의 노드
 Figure 7. The nodes in T3

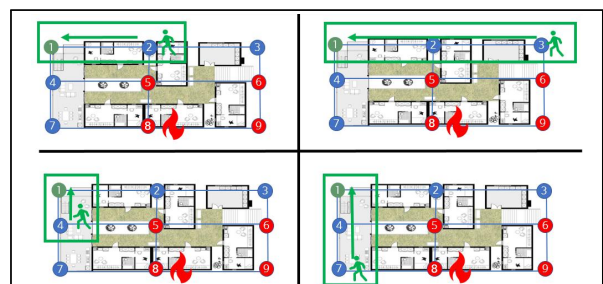


그림 8. T3 시점의 2,3,4,5 노드의 대피경로
 Figure 8. Evacuation path of 2,3,4,5 node in T3

2. 지하 연기 확산 예측 및 최적 대피경로 도출

지하 공간의 경우 아래 그림9와 같이 2개의 출구 노드, 10개의 일반노드로 구성하였으며, 화재는 11번 노드에서 발생하였다. 아래 그림 10과 같이 각 노드 별로 가스 센서를 통해 가연성 가스 농도 값을 측정하였다. 이에 따라 연기 확산을 예측하고 각 노드 별 최적 대피 경로를 산출하였다.



그림 9. 지하 공간 구상도
Figure 9. Space design in underground

노드	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T=1 (발화시점)	CO	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.14	0.08
	O ₂	18	18	18	18	18	18	18	18	18	15	18
T=2 (1초 후)	CO	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.14	0.14	0.14	0.14	0.195	0.14
	O ₂	17	17	17	17	17	15	15	15	15	7	15
T=3 (2초 후)	CO	0.125	0.14	0.14	0.14	0.14	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195
	O ₂	16	15	15	15	15	7	7	7	7	7	7

그림 10. 각 노드 별 CO, O₂ 값
Figure 10. CO, O₂ values for each node

아래 그림 11은 T=1(발화시점)일 때의 지하 공간을 나타낸 그림이며, 그림 12는 2,3번 노드의 최적 대피 경로를 표현한 그림이다. T=1일 때 피난계단은 1,10번 노드이며 연기의 확산이 일어나지 않은 상태이므로 각 노드는 가장 가까운 피난계단을 이용하여 대피할 수 있다. 아래의 표 10은 노드별 최적 대피경로를 통한 대피 시간이다.

표 10. T1 노드 별 대피경로 및 대피시간
Table 10. Evacuation path and time of T1 juncture nodes

노드	경로	시간(sec)
2	2-7-10	25.97
3	3-2-7-10	51.94
4	4-5-6-1	49.35
5	5-6-1	38.96
6	6-1	12.98
7	7-10	12.98
8	8-7-10	38.96
9	9-5-6-1	51.94
12	12-9-5-6-1	64.93

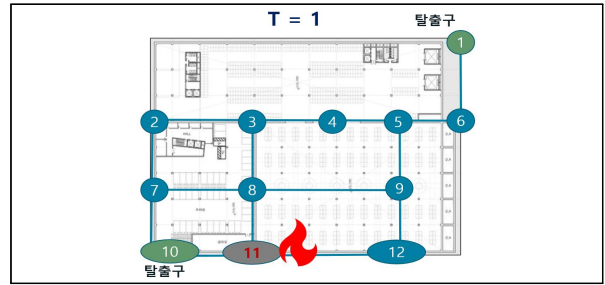


그림 11. T1 시점의 노드
Figure 11. The nodes in T1

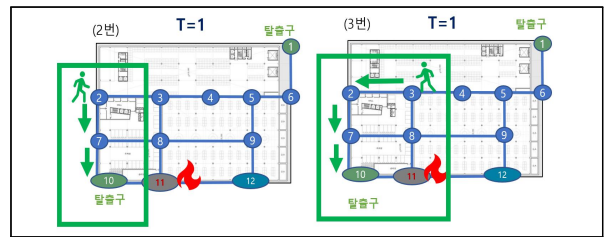


그림 12. T1 시점의 2,3 노드의 대피경로
Figure 12. Evacuation path of 2,3 node in T1

아래 그림 13은 T=2(발화 시점 N초후)의 시점이다. 지하 공간은 지상 공간과 다르게 바람의 영향을 받지 않아 연기는 일정하게 확산하며, 위 그림 10에서 노드 별 가스 농도 수치를 측정하여 인명 안전 기준에 따라 7,8,9,10,12번 노드는 폐쇄됐음을 나타냈다. 따라서 아래 표 11과 같이 최적 대피 경로가 변경되었음을 나타냈고, 아래 그림 14는 2,3번 노드의 변경된 대피경로를 나타낸 그림이다.

표 11. T2 노드 별 대피경로 및 대피시간
Table 11. Evacuation path and time of T2 juncture nodes

노드	경로	시간(sec)
2	2-3-4-5-6-1	90.90
3	3-4-5-6-1	64.93
4	4-5-6-1	49.35
5	5-6-1	38.96
6	6-1	12.98

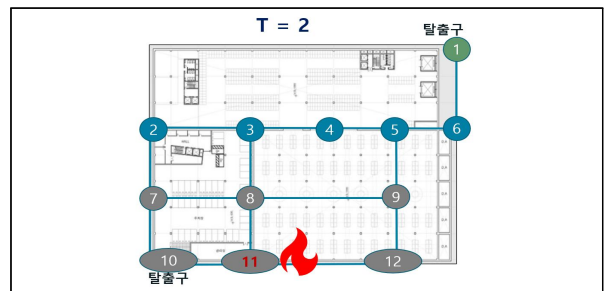


그림 13. T2 시점의 노드
Figure 13. The nodes in T2

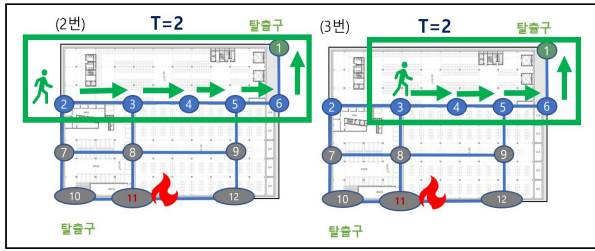


그림 14. T2 시점의 2,3 노드의 대피경로
 Figure 14. Evacuation path of 2,3 node in T2

아래 그림 15는 T=3(발화 시점 2N초후)의 시점이다. T=2 시점 이후 피난계단 1번 노드를 제외한 모든 노드에서 가스 농도가 위험 수준에 도달했다.

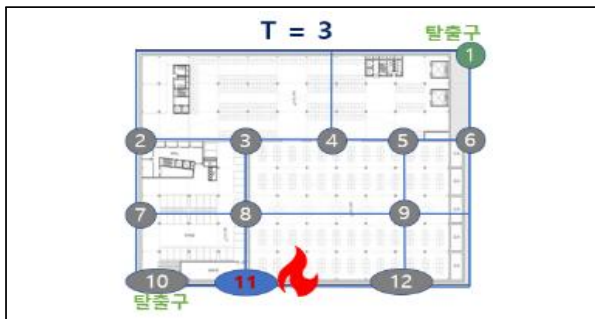


그림 15. T3 시점의 노드
 Figure 15. The nodes in T3

V. 결론

현대 사회에서 기하급수적으로 늘어가는 인구를 수용하기 위해 수직 및 수평으로 확장되는 건물들이 많아짐에 따라 화재와 같은 재난 발생 시 피해가 커지고 있다. 이에 공간적 특성에 따라 화재 대피시스템이 부족한 점을 분석하고 보완하는 목적으로 지상에서는 바람의 영향으로 인한 수직적 특성과 지하에서의 연기의 영향으로 인한 수평적 특성을 통해 해당 공간에 적절한 화재 대피 시스템을 제안하였다. 위험 발생 구역과 현재 위치를 기반으로 최적 대피 경로를 도출하기 위해 Dijkstra 알고리즘을 사용하여 빠른 계산 시간으로 유용한 경로 산출이 가능함을 검증하였다. 최적 대피 경로에 따라 유도등을 제어하여 대피자에게 안내를 통해 빠르게 대피할 수 있도록 구성하였다. 따라서 본 시스템을 통한 기대효과는 다음과 같다.

1) 화재가 발생하였을 때, 화재를 인식하고 화재 확산지역을 예측하며 신속하게 대피하여 피해를 최소화할 수 있다.

2) 알고리즘을 통한 최적 대피 경로를 안내함으로써 재실자에게 신뢰성 있고 안전한 대피를 돕는다.

3) 실시간으로 안전한 경로를 갱신하고 안내하여 대피 지연을 방지할 수 있다.

향후 연구에서는 현대 사회의 건물에 직접 사용할 수 있도록 상용화를 위한 알고리즘의 신뢰도 및 정확도 분석과 센서 배치 등을 위한 위험도 평가와 위치 자동 인식 기능에 대한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] Jaeseong Park, Dongjun Yoon, Jinwoo Lee, Dokyun Kim, Junhyung Kwon, Jiwon Baek, Yujin Noh, Insoo Lee, "Implemented and analysis of a fire escape system using IoT sensors at the scene of fire", Journal of the Korea Information Technology Society, Vol. 26, No. 2, pp. 482-492, 2020.
- [2] Suck-Hwan Joung, Myong-Oh Yoon. "Vertical Evacuation Speed in Stairwell of a High-rise Office Building". Fire Science and Engineering Vol.29 No.3, pp 13-20, 2015.
- [3] Lee Jae Wook. "A Study on Ways to Improve Safety Management through Analysis of Fire Cases in Multiple-user Buildings", The Journal of the Convergence on Culture Technology, Vol. 8, No. 3 pp.191-201, 2022. DOI: 10.17703/JCCT.2022.8.3.191.
- [4] Ah-Reum Hong, "A Study for Evacuation Performance Improvement of Emergency Exit Light Pictogram". Graduate School of Gachon University, 2016.
- [5] Yoo-Sik Kim and others. "Fire Tactics I (Fire III)". National Fire Service Academy, 2019.
- [6] "A Study on the Establishment of Emergency Evacuation System through Multi-media Guidance in the Event of Disaster and Fire", Local administrative informatization workshop, Incheon, 2015.
- [7] Kook-Sam Jeong, "Fire Protection Measures for Underground Facilities", Journal of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 1, No. 1, pp. 34-39, 2001.
- [8] Seong-kwon Cheon, Geun-Deok Kim, and Jong-geun Kim. "A Speed-Based Dijkstra Algorithm for the Line Tracer Control of a Robot", Korea Society Of IT Services, Vol. 10, No. 4, pp. 259-268, 2011.